

基于显微组织图片的涂层热导率有限元计算研究

沈 伟, 范群波, 王富耻, 马 壮

(北京理工大学材料科学与工程学院, 北京 100081)

摘要:综合数字图像处理技术与有限元网格模型生成原理,提出了基于涂层显微组织图片的有限元网格模型生成方法。利用有限元程序,通过热障涂层特定区域的热导率计算,研究分析了涂层的隔热性能。以等离子喷涂 ZrO_2 涂层为例,先将得到的 ZrO_2 涂层物理图像由图形格式转换成数字格式;然后,通过阈值分割处理和有限元网格生成方法,生成包含涂层材料组元属性的有限元网格模型;在生成的有限元网格模型基础上,再进行 ZrO_2 涂层热作用下的温度场模拟;最后,利用傅立叶热传导方程,计算了 ZrO_2 涂层显微组织图片所代表区域的有效热导率。进一步分析了横向热导率和纵向热导率之间的差异。分析表明:等离子喷涂 ZrO_2 涂层的横向热导率比纵向热导率要高,涂层有效热导率受孔隙率和孔隙形状共同影响。

关键词:数字图像处理;有限元网格模型;有效热导率

中图分类号: TG174

文献标识码: A

文章编号: 1000-985X(2009)S1-0267-04

Finite Element Simulation of Thermal Conductivity Based on Microstructural Images of Thermal Barrier Coatings

SHEN Wei, FAN Qun-bo, WANG Fu-chi, MA Zhuang

(School of Material Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Using his paper presents a method to generate the finite element grid model based on digital image processing theory and finite element mesh generation principle. The proposed method is used to model temperature distribution of thermal barrier coating (TBC) with the aid of finite element program. Take ZrO_2 TBC as an example: firstly, transfer the microstructural image of ZrO_2 TBC to digital data; then a finite element grid model according to the digital data is generated by thresholding segmentation; finally, on the basis of the established finite element grid model, the classic Fourier's equation is employed to compute the effective thermal conductivity. Further numerical simulation results show that the effective thermal conductivity in the spray direction is lower than that in the transverse direction. The effective thermal conductivity of TBC is affected by porosity and shapes of the pores significantly.

Key words: digital image processing; finite element grid model; effective thermal conductivity

1 引 言

热障涂层(TBC)常常是由陶瓷、孔洞、裂纹等组成。当TBC受到外界热作用时,孔洞、裂纹等缺陷对热量的传递有着很大的影响,同时,它们之间的相互作用也非常复杂^[1,2]。TBC的物理性能与材料的非均质性有着密切的联系。因此,基于涂层真实的显微组织结构对涂层进行热学性能分析就显得非常重要。

基金项目:国家自然科学基金(Na 50801005)

作者简介:沈 伟(1983-),男,江苏省人,博士。E-mail: shenwei@bit.edu.cn

最近,一些学者开展了部分基于涂层材料非均质性的热学分析和力学分析^[3-7]。美国国家标准与技术研究院(NIST)开发了面向对象有限元技术^[3](Object Oriented Finite, 简称 OOF)。由于 OOF 处理的对象比较单一,后处理功能不足等缺点,限制了其进一步的使用;Z Wang 和 A. Kulkarni 等^[8]研究了气孔和界面对等离子喷涂 ZrO_2 涂层的热学性能和力学性能,并对比了采用随机模型和采用 OOF 程序得到的结果之间的异同。P. Michlik 和 C. Berndt^[9]计算了涂层的部分物理性能。Amol D. Jadhav 和 Nitin P. Padture 等^[10]采用 OOF 程序研究了气孔和裂纹对等离子喷涂涂层隔热性能的影响。这些计算方法大多都是基于 OOF 程序进行的,具有一定的局限性。

本文以等离子喷涂 ZrO_2 涂层为研究对象。采用基于数字图像处理技术的有限元网格模型生成方法,结合傅立叶热传导方程计算了涂层的有效热导率,并研究了涂层的隔热性能。

2 计 算

2.1 图像数字化

先通过扫描电子显微镜(SEM)得到 ZrO_2 涂层横截面的局部位置放大物理图像文件,然后选取图像中某一特定区域,如图 1 所示。就其自然格式而言,计算机中的物理图像文件是不能直接用来处理的,必须先对它进行数字图像处理。把模拟图像在空间上、幅值上进行离散化,将其转换成对应的数字形式,离散化了的图像称为数字图像^[11]。数字图像处理技术在广义上是指各种与数字图像处理有关的技术的总称。目前主要指应用数字计算机和数字系统对数字图像进行加工处理的技术。

图像本身是一个二维连续函数,图像的幅值是其位置的连续函数。然而在计算机中对图像进行数字处理时,首先必须对其在空间和幅度上进行数字化。

对二维图像按照像素点进行均匀采样,就可以得到一幅离散化成 $M \times N$ 像素点单元的数字图像。数字图像在计算机中是由一个个像素点组成的,每个像素点有一对应的整数值来代表该像素点的灰色度。整个图像由有着不同灰色度的像素点组成,这些像素点的灰色度构成了一个离散的函数 $f(x, y)$ ($x = 1 \sim M, y = 1 \sim N$):

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(1, 1) & f(1, 2) & \dots & f(1, N) \\ f(2, 1) & f(2, 2) & \dots & f(2, N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f(M, 1) & f(M, 2) & \dots & f(M, N) \end{bmatrix} \quad (1)$$

图像不同的存储格式都有与其对应的离散函数。首先,将图像由图形格式转换成数字格式,这些数据是进一步图像数字处理的基础。

2.2 灰度阈值分割处理

灰度阈值分割是最常见的图像分割处理方法。在多数情况下,当图像内部像素灰度之间存在较大的差异时,设置一个合适的阈值可以将它们分开。

从图 1 可以看出,涂层显微组织图片中黑色部分代表了孔洞和裂纹,黑色的灰度值比较低;而 ZrO_2 材料呈灰白色,所属的灰度值比较高。由于图像只包含两种组元,所以根据灰度值将整个图像分成 2 个部分,转化成二值图像。根据下面的算式,得到一个二值图像:

$$f(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) \geq T \\ 0 & f(x, y) < T \end{cases} \quad (2)$$

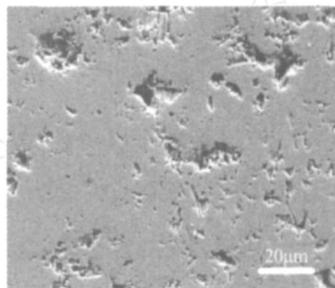


图 1 ZrO_2 涂层横截面显微组织图像 ($125 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$)

Fig 1 The cross-section microstructural image of ZrO_2 TBC ($125 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$)

T 值的选取直接影响着涂层的显微组织二值图像精度。 T 值设置太大,则 ZrO_2 组元含量会被减少; T 值设置太小,则 ZrO_2 组元含量会被扩大。图 2 为 T 值等于 50 的二值图像,较真实地反映了实际显微组织照片特征。

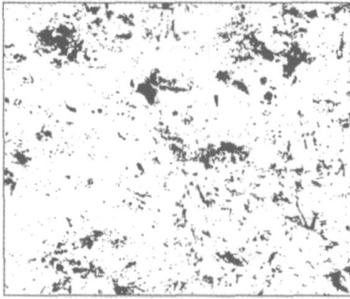


图 2 灰度阈值分割后得到的二值图像
Fig. 2 Two parts of image
by gray thresholding division

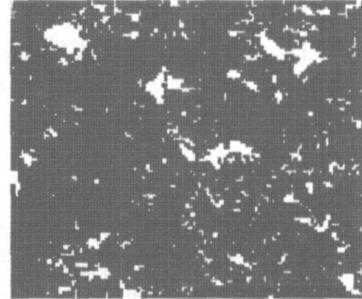


图 3 ZrO_2 涂层有限元网格模型(125 × 100)
Fig. 3 The finite element grid model
of ZrO_2 TBC (125 × 100)

2.3 有限元网格模型生成

为了进一步进行温度场计算与分析,需要将经过灰度阈值处理后的二值图像转换成有限元网格模型。根据不同的像素点灰度值对应着不同的材料组元,将像素点单元的集合转换成有限元网格单元的集合。在有限元计算中赋予相应的材料组元属性,从而在 ZrO_2 涂层隔热性能计算中考虑了 ZrO_2 涂层材料的非均质性。由于孔洞和裂纹的材料热导率很低,相对于 ZrO_2 可以忽略不计。因此,在建立有限元模型进行涂层热学性能计算时,可以不考虑孔洞、裂纹组元的影响。图 3 为根据涂层实际图像建立网格单元数为 125 × 100 的有限元网格模型,大小为 125 μm × 100 μm。

3 结果与讨论

在生成的有限元网格模型的基础上,赋予 ZrO_2 组元的热导率为 2.5 W/m · K,在有限元模型上下两端面分别施加 1 和 0 的温度载荷进行稳态热分析,左右两端为绝热边界条件。 ZrO_2 涂层稳态温度场分布如图 4 所示。图 4 表明,由于孔洞、裂纹的存在及其分布的不均匀性,导致了涂层稳态温度场的分布也极不均匀。尤其在孔洞、裂纹附近,温度梯度相对较大。孔洞、裂纹等缺陷的存在影响了涂层热量的传递。

根据傅立叶热传导方程得到涂层有效热导率的计算公式^[9]:

$$K_{eff} = \frac{h}{T \cdot w} \int K(n \nabla T) d \quad (3)$$

式中: K_{eff} 为有效热导率, h 为涂层的平均厚度, w 为涂层的宽度, T 为沿热流方向的温度梯度, K 为 ZrO_2 组元的热导率, d 为积分路径。

根据式(3)求得,孔隙率为 8.9% 的该 ZrO_2 涂层横向热导率为 1.9959 W/m · K,纵向热导率为 1.8646 W/m · K。计算表明:孔隙的存在降低了涂层的有效热导率;等离子喷涂 ZrO_2 涂层中沿喷涂方向较垂直喷涂方向具有更低的热导率,低的热导率决定了 ZrO_2 涂层沿喷涂方向具有更优的隔热性能。分析 ZrO_2 涂层图片的显微组织结构,裂纹分布以横向为主。裂纹的横向分布阻碍了热流的纵向传播,从而降低了涂层的纵向热导率,提高了涂层的隔热性能。涂层热导率受孔隙率和孔隙形状共同影响。计算结果与文献[8]中报道的数据基本一致,说明了该方法的准确性。

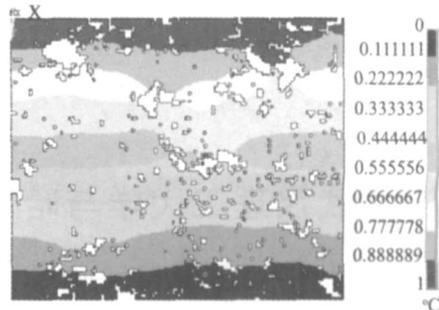


图 4 ZrO_2 涂层稳态温度场分布图
Fig. 4 Steady-state temperature distribution of ZrO_2 TBC

4 结 论

综合数字图像处理技术和有限元网格生成原理,提出了基于涂层截面显微组织图像的有限元网格模型生成方法,并利用傅立叶热传导方程分别计算涂层的横向和纵向的有效热导率。实现了基于真实材料显微组织图像的涂层有效热导率计算预测,分析了孔隙分布对涂层隔热性能的影响。计算结果与实验结果吻合良好,说明了该方法的准确性。

参 考 文 献

- [1] Heman H. Plasma-sprayed Coatings[J]. *Sci Am.*, 1988, **256**(9): 112-115.
- [2] Heman H, Shankar N R. Survivability of Thermal Barrier Coating[J]. *Mater Sci Eng*, 1987, **88**(1): 69-74.
- [3] Langer S A, Carter W C, Fuller E R. Object Oriented Finite Element Analysis for Materials Science[J]. *National Institute of Standards and Technology*, 1998: 2-8.
- [4] Hsueh C H, Fuller E R. Analytical and Numerical Analyses for two-dimensional Stress Transfer[J]. *Materials Science and Engineering*, 1999, **A268**: 1-7.
- [5] Chun-Hway H, Edwin R F. Residual Stresses in Thermal Barrier Coatings: Effects of Interface Asperity Curvature/height and Oxide Thickness [J]. *Materials Science and Engineering*, 2000, **A283**: 46-55.
- [6] Nakanura T, Qian G, Bemdt C C. Effects of Pores on Mechanical Properties of Plasma-sprayed Ceramic Coating [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2000, **83**(3): 578-584.
- [7] Zimmernann A, Carter W C, Fuller Jr E R. Damage Evolution During Microcracking of Brittle Solids[J]. *Acta Materialia*, 2001, **49**(1): 127-137.
- [8] Wang Z, Kulkarni A, Deshpande S. Effects of Pores and Interfaces on Effective Properties of Plasma Sprayed Zirconia Coatings [J]. *Acta Materialia*, 2003, **51**(18): 5319-5334.
- [9] Michlik P, Bemdt C. Image-based Extended Finite Element Modeling of Thermal Barrier Coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2006, **201**: 2369-2380.
- [10] Jadhav Amol D, Padture Nitin P, Jordan Eric H. Low-thermal-conductivity Plasma-sprayed Thermal Barrier Coatings with Engineered Microstructures[J]. *Acta Materialia*, 2006, **54**(12): 3343-3349.
- [11] 许录平. 数字图像处理 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.

· 信 息 ·

武汉理工大学与哈佛大学共建纳米联合重点实验室

日前,武汉理工大学与美国哈佛大学签订合作备忘录,决定在我校成立武汉理工大学-哈佛大学纳米联合重点实验室(WUT-Harvard Joint Nano Key Laboratory),由美国哈佛大学 Lieber院士担任实验室主任。

未来几年中,双方将加强合作,重点研究包括生物纳电子界面、纳电子探测器、新型纳电子细胞等在内的新型纳米材料和纳米生物医用材料。

双方希望通过若干年的努力,将该实验室建设成为在国际上具有重要影响的研究基地,并在新型纳米材料、生物纳电子界面、新颖高性能纳电子-细胞原料电池等方面的研究取得重要突破,承担一批国家和中美重大国际合作项目,从而推动中美纳米科技领域的合作研究与发展,为我国培养一批纳米科学技术、纳米生物医学技术和新能源材料技术领域的高水平优秀人才。

(来源:武汉理工大学)